

УДК 669.2+669.018.4

**П. Л. Резник<sup>1\*</sup>, Б. В. Овсянников<sup>2</sup>, Н. М. Дорошенко<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург<sup>2</sup>Каменск-Уральский металлургический завод, г. Каменск-Уральский\**p.l.reznik@urfu.ru*

## ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ И ДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТОК НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА Al–Cu–Mn–Ti

Исследовано влияние термической и деформационной обработок на микроструктуру и механические свойства сплава Al–Cu–Mn–Ti. Продемонстрирована возможность при сокращении времени термической обработки (ТО) литых слитков с одновременным понижением температуры деформации прессованием обеспечить повышенный уровень прочностных характеристик прутков в состоянии полной ТО.

*Ключевые слова:* МРСА, алюминий, механические свойства, экструзия, термическая обработка, Al–Cu–Mn

**P. L. Reznik, B. V. Ovsyannikov, N. M. Doroshenko**

## FEATURES OF INFLUENCE OF HEAT- AND DEFORMATION TREATMENTS ON MECHANICAL PROPERTIES OF Al–Cu–Mn–Ti

The influence of heat- and deformation treatments on the microstructure and mechanical properties of Al–Cu–Mn–Ti alloy was investigated. It was demonstrated that in case of time reduction of cast ingots heat treatment with simultaneous reduction of deformation temperature, it is possible to provide an increased level of rod strength characteristics.

*Key words:* EPMA, tensile properties, quenching, hot deformation, aging, heat treatment, Al–Cu–Mn

**И**зготовление экструдированием полуфабрикатов в виде профилей с круглым поперечным сечением из деформируемых алюминиевых сплавов системы Al–Cu–Mn с микродобавками переход-

ных металлов, получивших широкое распространение в авиационной и космической технике [1], представляет собой сложный, многоступенчатый, энергоемкий процесс [2], научно-обоснованная оптимизация которого для повышения эффективности производства представляется актуальной задачей.

Способом полунепрерывного литья в водоохлаждаемый кристаллизатор на ОАО «КУМЗ» были получены слитки сплава  $\text{Al}-6,5\% \text{Cu}-0,7\% \text{Mn}-0,15\% \text{Ti}$ . В качестве материала для проведения исследования использовались образцы от горячедеформированных прутков, экструдированных при различной температуре из слитков после различной температуры отжига (400 либо 530 °С). Нагрев под закалку до 535 °С, а также искусственное старение при 200 °С в течение 8 часов проводились в лабораторных печах. Испытания на одноосное растяжение по стандартным методикам проводили на универсальной испытательной машине Instron 3382. Микроструктуру изучали традиционными методами количественной металлографии, а также с помощью растрового электронного микроскопа, оснащенного приставкой для проведения рентгеноспектрального микроанализа.

Результаты механических испытаний экструдированных полуфабрикатов в горячепрессованном состоянии показали, что для отожденных при 400 и 530 °С слитков увеличение температуры прессования с 330 до 480 °С сопровождается повышением  $\sigma_b$  на 20 % до 260 МПа и  $\sigma_{0,2}$  на 10 % до 245 МПа. С повышением температуры прессования сплавов системы  $\text{Al}-\text{Cu}-\text{Mn}$  полуфабрикаты имеют более высокие прочностные характеристики, что связано с уменьшением доли рекристаллизованной структуры [3–5]. В микроструктуре прутков независимо от режима термической и деформационной обработок на границах зерен зарегистрирована высокая объемная доля интерметаллидных соединений  $\text{Al}_6(\text{CuFeMn})$  и  $\text{Al}_2\text{Cu}$ .

В микроструктуре закаленного прутка обнаружены внутризеренные дисперсные выделения продукта распада пересыщенного  $\text{Cu}$  и  $\text{Mn}$  твердого раствора на основе алюминия  $\text{Al}$  — фазы  $\text{Al}_{20}\text{Cu}_2\text{Mn}$ . Определенное средствами микрорентгеноспектрального анализа обогащение марганцем участков, прилегающих к границам зерен (вследствие склонности марганца к внутридендритной ликвации [6]), сохраняется как после горячей деформации, так и после последующей термической обработки, во время которой из  $\alpha$  ( $\text{Al}$ ) выделяется фаза  $\text{Al}_{20}\text{Cu}_2\text{Mn}$ . Как отмечается в [6], такой механизм способствует более равномерно-

му распаду твердого раствора меди в алюминии, за счет затруднения выделений и коагуляции упрочняющей фазы  $Al_2Cu$ .

Анализ влияния термообработки слитка и температуры прессования на механические свойства прутков в закаленном в воду с температуры  $535^\circ C$  состоянии показывает, что максимальные прочностные характеристики ( $\sigma_b$  —  $415$  МПа и в особенности  $\sigma_{0,2}$ — $215$  МПа) достигаются после закалки горячепрессованного при  $480^\circ C$  прутка, изготовленного из отожженного при  $400^\circ C$  слитка. Снижение температуры прессования до  $330^\circ C$  приводит к снижению  $\sigma_b$  на  $20\%$  и  $\sigma_{0,2}$  приблизительно на  $30\%$ . Аналогичная тенденция наблюдается независимо от режима отжига исходного слитка.

Испытания механических свойств прутков в состоянии полной термической обработки (искусственное старение при  $200^\circ C$   $8$  ч) показали, что с повышением температуры прессования с  $330$  до  $480^\circ C$  упрочняющий эффект также растет. Из анализа механических характеристик экструдированных полуфабрикатов в состоянии полной термической обработки следует, что влияние температуры отжига исходного слитка отсутствует.

Таким образом, проведенное исследование показало, что повышение температуры отжига исходного слитка с  $400$  до  $530^\circ C$  мало влияет на механические свойства как в горячепрессованном состоянии, так и в закаленном и состаренных состояниях. Установлено, что повышение температуры прессования с  $330$  до  $480^\circ C$  обеспечивает рост  $\sigma_b$  ( $\sigma_{0,2}$ ) на  $20\%$  ( $25\%$ ) в горячепрессованном состоянии и на  $25\%$  ( $65\%$ ) в закаленном состоянии, а также на  $10\%$  ( $12\%$ ) в искусственно состаренном.

Продемонстрирована возможность при сокращении времени термической обработки литых слитков с  $530^\circ C$  и  $12$  часов, до  $400^\circ C$  и  $2$  часов, с одновременным понижением температуры деформации прессованием с  $480$  до  $330^\circ C$  обеспечить требуемый повышенный уровень прочностных характеристик прутков в состоянии полной ТО.

### Литература

1. Polmear I. J. Light Alloys: From Traditional Alloys to Nanocrystals. Amsterdam : Elsevier, 2006. 421 p.
2. Totten D. E., MacKenzie D. S. Handbook of Aluminum: Volume 2: Alloy Production and Materials Manufacturing. New York : Marcel Dekker, 2003. 735 p.
3. Belov N. A., Eskin D. G., Aksenov A. A. Multicomponent Phase Diagrams: Applications for Commercial Aluminum Alloys. Amsterdam : Elsevier, 2005. 424 p.

4. Danilov S. V., Reznik P. L. Hot-rolled texture of FCC and BCC metals // Solid State Phenomena. 2018. V. 284. P. 605–609.

5. Effect of hot rolling rate on the structure and texture condition of plates of the Al–Si–Mg alloy system / M. L. Lobanov, Y. N. Loginov, S. V. Danilov, M. S. Karabanalov, M. A. Golovin // Metal science and heat treatment. 2018. V. 60, № 5–6. P. 322–328.

6. Мондольфо Л. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. М. : Металлургия, 1979. 640 с.